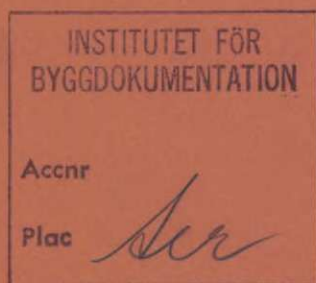


Termisk energi ur vattendrag

Värmeväxlare för sjövärmesystem — provanläggning i Storsjön

Lennart Backlund



R83:1982

TERMISK ENERGI UR VATTENDRAG

Värmeväxlare för sjövärmesystem
- provanläggning i Storsjön

Lennart Backlund

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
800102-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till FFV Underhåll, Östersund.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R83:1982

ISBN 91-540-3745-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

LiberTryck Stockholm 1982

SAMMANFATTNING

Sverige har ungefär 85 000 större och mindre sjöar med en sammanlagd areal av cirka 38 000 km². Den långa kustlinjen ger också en tillgänglig vattenareal för värmeutvinning av ungefär samma storleksordning. Till detta kommer vattendrag i form av åar och älvar. Den viktigaste begränsande faktorn vid värmeutvinning är att avståndet från vattendrag till energianvändare ej bör vara alltför stort (0 - 5 km). Eftersom vår bebyggelse i stor utsträckning ligger vid kuster och vattendrag utgör den under sommarhalvåret upplagrade energin i våra vattendrag en mycket värdefull potentiell resurs som skulle kunna användas för att minska vårt oljeberoende.

Metoder att utvinna denna energi börjar nu finnas ute på marknaden. Några krav på att vattnet skall ha en viss temperatur eller renhet synes inte föreligga.

Rapporten visar att energiuttag genom förläggning av ett slutet rörsystem direkt på vattendragets bottensedimentyta fungerar bra. Det är därvid av största vikt att bemästra problemet med de flytkrafter som uppstår vid ispåfrysning vid energiuttag i rörsystemet.

Det intressantaste delresultatet i rapporten torde vara de iakttagelser som visar att minst lika stor del av den i rörsystemet upptagna energin kommer från bottensedimenten som från den fria vattenvolymen.

Detta stämmer inte med de värden som kan förväntas med ledning av tidigare uppgifter på området. Även om hänsyn tas till en ökning av temperaturgradienten i bottensedimenten vid energiuttag kan detta inte utgöra hela förklaringen till det relativt höga energiflödet till iscylinderns undersida. Jag vill inte spekulera för mycket i detta, men en förklaring skulle kunna vara termiskt betingade densitetsströmningar i vattnet i bottensedimentens övre skikt. När den nollgradiga isfronten utbreder sig nedåt i den cirka tvågradiga bottensedimenten är det rimligt att anta att man lokalt runt isfronten får en strömningsbild som starkt avviker från den som råder vid opåverkat värmefflöde från bottensediment till bottenvatten.

Det är önskvärt att den här frågan blir föremål för ytterligare undersökningar. Om de energiupptagande anordningarna utformas så att den här effekten utnyttjas innebär detta mindre dimensioner och lägre investeringskostnader per uttagen effektenhet. För att undvika felkällor vid uppskalning av resultaten är det en stor fördel om undersökningarna kunde göras i anslutning till en större sjövärmearläggning.

INNEHÅLL

1.	INLEDNING	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Projektets syfte	7
1.3	Provningsmiljö	7
1.4	Kunskaper på området	8
2.	METODBESKRIVNING	9
2.1	Provanläggning	9
2.1.1	Geografiskt läge	9
2.1.2	Energiupptagare	9
2.1.2.1	Värmeväxlare förlagd på sjöbotten utan nedgrävning i bottensedimenten	9
2.1.2.2	Nedgrävda slingor i sjöbotten	10
2.1.3	Transportledning	10
2.1.4	Värmepump	10
2.1.5	Rörinstallationer	11
2.1.6	Asfaltyta	12
2.1.7	Energilager	12
2.1.8	Mätutrustning	12
2.1.8.1	Mätsystem A	12
2.1.8.2	Mätsystem B	13
2.2	Genomförande	13
3.	RESULTATREDOVISNING	15
3.1	Mätnoggrannhet	15
3.1.1	Termoelementgivare	15
3.1.2	Motståndstermometrar	15
3.1.3	Kalibrering	15
3.1.4	Datalogger	15
3.1.5	Flödesmätare	15
3.2	Mätresultat	15
4.	SLUTSATSER FRÅN UNDERSÖKNINGEN	17
4.1	Hur stor del av den från vattendraget uttagna energin utgörs av energi från vattnet, botten eller frigjord energi vid isbildning på energiupptagaren	17

4.2	Inverkan på vattentemperaturen	20
4.3	Förankring	21
4.3.1	Fastfrysning	21
4.3.2	Heat pipes	21
4.3.2.1	Tjälssäkrade förankringspunkter	22
4.4	Driftsäkerhet	23
4.4.1	Funktionssäkerhet	23
4.4.1.1	Vattentemperaturen	23
4.4.1.2	Föroreningar i vattnet	23
4.4.1.3	Bottenförhållanden	23
4.4.1.4	Effekttålighet	23
4.4.1.5	Komplexitet i svår miljö	24
4.4.1.6	Känslighet för mekaniska skador	24
4.4.2	Underhållsmässighet	24
4.4.3	Underhållssäkerhet	24
4.5	Miljöaspekter	24
4.6	Jämförelse mellan nedgrävd och icke nedgrävd sjövärmexlare	25
4.7	Asfaltyta som solfångare	25
4.8	Avisning av asfaltyta	26

1. INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Projektet startades upp för att prova en ny metod att förhindra halka på start- och landningsbanor. FFV Underhåll i Östersund fick 1977 av Försvarets Materielverk i uppdrag att söka alternativa metoder för att åtgärda halka på flygvapnets rullbanor. Detta resulterade så småningom i uppbyggnaden av en provanläggning i liten skala vid Sjöflyget, F4 i Östersund.

Flygstaben ansåg att de erhållna resultaten var mycket intressanta men anförde samtidigt att det här systemet för halkbekämpning ej fältmässigt passade in i flygvapnets bassystem. Flygstaben ville dock följa den fortsatta utvecklingen men avslutade sitt finansiella stöd till projektet 1979.

Eftersom projektet avsåg utvinning av termisk energi ur vattendrag var inriktningen i linje med statsmakternas önskan att finna nya metoder att reducera vårt oljeberoende. FFV Underhåll ansökte därför om medel från BFR och STU för att kunna fortsätta de påbörjade sjövärmeproven. BFR gick in och började stödja projektet 1979-07-01.

1.2 PROJEKTETS SYFTE

Huvudsyftet med projektet är att undersöka om det är praktiskt möjligt att på ett ekonomiskt försvarbart sätt utnyttja den i vattendragen upplagrade värmeenergin för uppvärmningsändamål.

I den här rapporten kommer följande huvudfrågor att behandlas.

- Hur stor del av den från vattendraget uttagna energin utgörs av energi från vattnet, botten eller frigjord energi vid isbildning på energiupptagaren.
- Inverkan på vattentemperaturen.
- Förankring.
- Driftsäkerhet.
- Miljöaspekter.
- Jämförelse mellan nedgrävd och icke nedgrävd sjövärmeväxlare.
- Asfaltyta som solfångare.
- Avisning av asfaltyta.

1.3 PROVNINGSMILJÖ

Proven genomförs i naturlig miljö med energiupptagaren placerad i en vik av Storsjön i Jämtland. Storsjön regleras årligen mellan dämningssgränsen 293,25 meter över havet och sänkningsgränsen 290,50 meter över havet. Islossningen sker när vattenståndet är som lägst.

Proven utförs således i mycket realistisk miljö.

Det är både fördelar och nackdelar med detta jämfört med prov i laboratoriemiljö.

Den största fördelen är att provningsresultaten direkt blir relevanta och tillämpbara i fullskaleanläggningar.

Sannolikheten för obehagliga överraskningar föranledda av skillnaden mellan en skyddad och i vissa avseenden tillrättalagd laboratoriemiljö och verklig nordisk utemiljö blir mindre. Vid uppbyggnaden av provanläggningen konfronteras man med de problem som är normala vid byggnation i vattendrag. Det är nödvändigt att ta hänsyn till vädrets makter och årstidsvariationer. Detta tvingar fram en mycket nyttig realism i utveckling och provning.

Nackdelen med att arbeta direkt i naturlig miljö är att provningen kan försenas och hindras av faktorer som är svåra att förutse och som man inte kan påverka.

1.4 KUNSKAPER PÅ OMRÅDET

Förslag att ta värme från vattendrag för bostadsuppvärmning har säkert diskuterats av och till under många år. Det är dock först på senare tid som intresset har blivit så stort att noggrannare undersökningar har börjat genomföras. Det finns således ej något större utbud av litteratur på området.

2. METODBESKRIVNING

2.1 PROVANLÄGGNING

Provanläggningen består av fem huvuddelar nämligen: två stycken energiupptagare i vattendraget, ett plaströrsystem förlagt i en asfaltyta, ett energilager i form av ett antal nedborrade stålrör i marken samt en maskincentral med värmepump, transportledningar och mätutrustning. Se figur 2.1.

2.1.1 Geografiskt läge

Anläggningen är lokaliserad till Sjöflyget, Jämtlands Flygflottilj i Östersund. Det vattendrag som utnyttjas för utvinning av termisk energi är Kungsgårdsviken i Storsjön, Jämtland. Se figur 2.1.1.

2.1.2 Energiupptagare

Vissa delar och utföranden är patentskyddade för den här energiupptagaren.

2.1.2.1 Värmeväxlare förlagd på sjöbotten utan nedgrävning i bottensedimenten.

En värmeväxlare är förlagd direkt på sjöbotten utan nedgrävning i bottensedimenten 170 m från strandlinjen. Se figur 2.1. Största vattendjupet ovanför värmeväxlaren varierar mellan 1,90 m och 4,65 m. Minsta vattendjupet ovanför värmeväxlaren varierar mellan 0,60 m och 3,35 m. Storsjöns vattenstånd regleras årligen mellan 290,50 m ö h sänkningsgränsen och 293,25 m ö h dämningssgränsen.

Bottensedimenten består vid värmeväxlarens förlägningsplats av finkornig sand och humusämnen.

Värmeväxlaren är uppbyggd av polyeten tryckrör typ PEL tryckklass PN4. 11 stycken 50 m långa rör med ytterdiametern 40 mm och godstjockleken 2,5 mm har parallellkopplats mellan två samlingsrör enligt figur 2.1.2.1.

Samlingsrören utgörs av polyeten typ PEH tryckrör PN3. Det ena samlingsröret har en ytterdiameter på 90 mm godstjocklek 3,0 mm, det andra har ytterdiametern 110 mm och godstjockleken 3,5 mm.

Varje parallellrör kan stängas av med hjälp av en kulventil i anslutning till det ena samlingsröret.

De parallellkopplade rören är utförda enligt figur 4.1 med ett inre vätskefyllt rör med ytterdiametern 28 mm. Det inre röret är av typen korrugerat kabelskyddsrör utfört i polyeten. Det flyter i värmebärarmediet. För att förstärka flytkraften hos innerröret har i det här fallet en lina med flytkroppar införts i innerröret.

Avsikten med det här arrangemanget är att styra värmebärarflödet så att det strömmar i spaltöppningen nedtill i ytterröret. Genom det här utförandet tillgodogör man sig den högre botten-temperaturen bättre samtidigt som isbildningen på rörets översida bromsas.

Vid fast botten med hög densitet hos bottensedimenten innebär den här extra nedkyllningen på de bottenförlagda rören undersida att rören fryser fast i botten.

Om bottensedimenten utgörs av material med låg densitet krävs annan förankring för att uppta de flytkrafter som ispåfrysningen av rören ger upphov till. Värmeväxlaren har på vissa sektioner, se figur 2.1.2.1, förankrats med hjälp av heat pipes eller värmerör. Det är en komponent som har använts bland annat i rymdfarkoster för transport av energi. Utmärkande för ett värmerör är dess stora värmeledningsförmåga. Teoretiskt är värmeröret en isoterm enhet. Det innebär att om man fäster det bottenförlagda rörsystemet i värmerör som är nedförda i bottensedimenten erhålles två funktioner. Den första och viktigaste är förankring genom att den isbildning som ger upphov till flytkrafter ger is även runt värmeröret nere i bottensedimenten. Den andra funktionen är energitillförsel från det djup som värmeröret har kontakt med i bottensedimentet upp till värmeväxlaren.

2.1.2.2 Nedgrävda slingor i sjöbotten

Förutom värmeväxlaren i punkt 2.1.2.1 finns en värmeväxlare nedgrävd cirka 0,2 m ned i sjöbotten cirka 50 m från strandlinjen se figur 2.1. Största vattendjupet ovanför förläggningsplatsen är 2,60 m vid högsta vattenståndet i Storsjön. Eftersom Storsjöns vattenstånd regleras 2,75 m varje år är förläggningsplatsen torrlagd under mars, april, maj varje år då vattenståndet är som lägst.

Värmeväxlaren lades ut och grävdes ned 1979-05-21--22. Förläggningsplatsen var då torrlagd så att en grävmaskin kunde gå ut och gräva ned plaströren i bottensedimenten.

Sjöbotten består av finkornig sand och lera på förläggningsplatsen.

Värmeväxlaren består av polyeten tryckrör typ PEL tryckklass PN6. Fem stycken 200 m långa rör med ytterdiametern 40 mm godstjocklek 3,7 mm har parallellkopplats till en konfiguration enligt figur 2.1.2.2.

2.1.3 Transportledning

Transportledningen som förbinder de i sjön förlagda värmeväxlarna med värmepumpen utgörs av två stycken polyeten tryckrör typ PEL tryckklass PN6. Ytterdiametern är 90 mm och godstjockleken 8,2 mm. Längden av dubbelledningen från värmepump till den i botten nedgrävda värmeväxlaren är 160 m. Via en förgrening med avstängningsventiler fortsätter huvudtransportledningen ytterligare 140 m ut till den utan nedgrävning bottenförlagda värmeväxlaren.

2.1.4 Värmepump

Som värmepump används ett Carrier standard vattenkylaggregat typ 30 QA 213.

Nominell kylkapacitet 47,2 kW

Nominell effektupptagning 11,9 kW från elnätet

Ovanstående värden är baserade på en utgående kallvatten-temperatur av $+7^{\circ}\text{C}$ och en kondenserings-temperatur av $+35^{\circ}\text{C}$.

Kylmaskinen är av halvhermetisk typ. Detta innebär att drivmotorn är sammanbyggd med kompressorn och kapslad så att det cirkulerande köldmediet på sin väg från förångaren till kompressorn passerar förbi och kyler elmotorns lindningar.

Som köldmedium används Freon R502.

Förångaren är av typ tubpanna med u-formiga invalsade koppar-rör. Den effektiva kylvytan hos förångaren är $5,21 \text{ m}^2$.

Kondensorn är av typ tubpanna av samma konstruktion som förångaren. I kondensorn går dock värmebäraren inne i tuberna och köldmediet på utsidan av tuberna. I förångaren går köldmediet inne i tuberna i tubpannan och köldbäraren utanför tuberna. Den effektiva värmeväxlarytan är i kondensorn $7,68 \text{ m}^2$.

Vattenkylaggregatet är utrustat med kapacitetsreglering. Kapacitetsregleringen styrs via två stycken trestegstermostater. Termostaterna känner av temperaturerna hos energibärarmedierna på förångar- respektive kondensorsida och reglerar vattenkylaggregatet i stegen 0, 33, 66 och 100 % av full effekt.

2.1.5 Rörinstallationer

Rörinstallationen är utförd av Calor-Celsius i Östersund. Konstruktion och ritningar har gjorts av Calor-Celsius i Umeå sedan anläggningen skisserats av FFV Underhåll i Östersund.

Rörinstallationen kan indelas i fyra huvuddelar.

1. Vattenkylaggregat med förångare och kondensor
2. Sjödelen med de två bottenförlagda värmeväxlarna
3. Asfaltdelen
4. Värmelager

För vardera av sjödelen, asfaltdelen och värmelagret finns en rörkrets med i huvudsak följande utrustning. Filter, flödesmätare, värmemängdmätare, termometrar, manometrar, cirkulationspump, expansionskärl, regler- och avstängningsventiler.

Sjödel, asfaltdel och värmelager kan kopplas direkt till varandra. De kan också kopplas till varandra via värmepumpen. Var och en av de tre enheterna kan därvid kopplas antingen till kondensor eller förångare.

Det är också möjligt att parallellkoppla enheter över förångare eller kondensor.

Anläggningen är utrustad med automatiskt tryckhållningssystem.

2.1.6 Asfaltyta

Provanläggningen byggdes för att bland annat i liten skala prova metoden att med hjälp av värme förhindra och åtgärda halka på landningsbanor. Till värmepumpen är därför en asfaltyta med ett inbyggt plaströrnät kopplat, se figur 2.1.6.1.

Asfaltytan har dimensionerna 10 m x 20 m. Vid uppbyggnaden gjordes först en utjämning av befintlig grusplan med väghyvel. Därefter utläggning av asfaltblandat grus, 220 kg/m^2 Ag. På detta lades ett slitlager av asfalt 80 kg/m^2 Ab. I denna asfaltyta lades vid uppbyggnaden plaströr in enligt figur 2.1.6.2.

De inlagda plaströren är av typ förnätad polyeten PEX med ytterdiametern 25 mm och godstjockleken 2,3 mm.

2.1.7 Energilager

Ett energilager har etablerats under asfaltytan, 10 stycken 10 m långa stålrör med 140 mm ytterdiameter och 5 mm godstjocklek har borrats ner i olika vinklar in under asfaltytan, se figur 2.1. Marken runt rören utgörs av sand och lerlager.

2.1.8 Mätutrustning

Provanläggningen har utrustats med två stycken elektroniska mätsystem. Det ena mätsystemet omfattar den inre av de sjöförlagda värmeväxlarna samt maskinrum, asfaltyta och energilager. Det andra mätsystemet omfattar den yttre av de sjöförlagda värmeväxlarna.

2.1.8.1 Mätsystem A

Mätsystemet som omfattar den inre av de sjöförlagda värmeväxlarna, maskinrum, asfaltyta och energilager är uppbyggt med en ACUREX datalogger typ Autodata Ten/10 som centralenhet. Upptagen information lagras på magnetband med hjälp av en till dataloggern ansluten bandspelare av märket Techtran typ 822 med två bandkassetter.

Mätningar görs kontinuerligt i ett stort antal mätpunkter, se figur 2.1.8.1.

Dataloggern har 60 analoga och 15 digitala ingångar.

Som temperaturgivare används resistanstermometer 100 ohm Pt $\alpha = 0,00385$ med noggrannheten 1/10 Din 43760 eller $0,03^\circ\text{C}$ vid 0°C . Resistansgivarna är inkopplade via fyrledarkoppling till dataloggern.

Även termoelement används som temperaturgivare i det här mätsystemet. Termoelementgivarna är av Chromel-Alumel, typ k enligt Din 43710.

Som flödesmätare används Armatur Jonsson AJ 7161-50 $\pm 2\%$. Mätning av eleffekt och elenergi görs med standard 3-fas kWh-mätare. kWh-mätarna har via optisk koppling anslutits till dataloggern.

Två stycken vindmätare används för registrering av vindhastigheten vid asfaltytan.

Den ena är av märket Windmaster och har integreringsverk för medelvärdesbildning av vindhastigheten över önskade intervall.

Den andra vindmätaren är av märket Juros M57A.

Båda vindmätarna är anslutna till dataloggern.

2.1.8.2 Mätsystem B

Mätsystemet för den yttre av de sjöförlagda värmeväxlarna är uppbyggt kring ett FLUKE Tem Pak dataloggersystem. Det består av en digital termometer 2180 A med en upplösning på $0,01^{\circ}\text{C}$, en Scanner 2300 A samt en programmerbar printer 2030 A.

Dataloggern har 50 ingångskanaler RTD.

Som temperaturgivare används resistanstermometer 100 ohm Pt $\alpha = 0,00385$ med noggrannheten $1/10$ Din 43760 eller $0,03^{\circ}\text{C}$ vid 0°C . Resistansgivarna är inkopplade via fyrledarkoppling till dataloggern se figur 2.1.8.2.

2.2 GENOMFÖRANDE

Vintertid har energi tagits upp från den bottenförlagda värmeväxlaren och använts för att värma den asfaltytbelagda provytan. Under kortare perioder har energi lagrats i det under asfaltytan etablerade energilagret.

Sommartid har asfaltytan utnyttjats som solfångare. Den upptagna värmeenergin har kylts bort i den inre av de båda sjöbottenförlagda värmeväxlarna.

3 RESULTATREDOVISNING

3.1 MÄTNOGGRANNHET

3.1.1 Termoelementgivare

Noggrannheten för termoelementgivarna uppges av fabrikanten vara $\pm 2,25^{\circ}\text{C}$ Norm ASTM beteckning E230-72.

3.1.2 Motståndstermometrar

Motståndstermometrar har noggrannheten 1/10 Din 43760 vilket i det här fallet betyder $0,03^{\circ}\text{C}$ vid 0°C . Motståndstermometrar är via fyrledarkoppling anslutna till respektive datalogger.

3.1.3 Kalibrering

Kalibrering av termoelementgivare och motståndstermometrar har gjorts mot ett LAUDA MGW typ RC20S isbad med reglernoggrannheten $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ och upplösningen $0,01^{\circ}\text{C}$.

Kalibrering gjordes av samtliga termoelementgivare och motståndstermometrar när de var slutgiltigt anslutna till respektive datalogger. Kalibreringen omfattade således hela mätsystemkedjan från givare till avläst värde i befintlig uppkoppling.

3.1.4 Datalogger

För Acurex Autodata Ten/10 anges den totala noggrannheten för instrumentet vara $+ 0,4^{\circ}\text{C}$ vid mätning med termoelement och $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ vid mätning med motståndstermometer.

Totala instrumentnoggrannheten för Fluke Tem Pak uppges till $+ 0,020^{\circ}\text{C}$ vid kalibrering och $+ 0,089^{\circ}\text{C}$ eller $+ 0,087$ ett år efter kalibrering vid mätning under respektive över noll med motståndstermometer Pt 100 ohm $\alpha = 0,00385$.

3.1.5 Flödesmätare

I provanläggningen används tre stycken flödesmätare Armatur Jonsson typ AJ 7161-50 med en garanterad noggrannhet $\pm 2\%$.

3.1.6 Kilowattimmätare

För mätning av elenergi till värmepump och cirkulationspumpar används fyra stycken standard kWh-mätare. Noggrannheten är $\pm 5\%$.

3.2 MÄTRESULTAT

Mätresultaten redovisas i form av temperatur-tid diagram i appendix 1. Med ledning av kanalnumret i diagrammet kan man i figur 2.1.8.1 och 2.1.8.2 se vilken givare och mätpunkt som diagrammet avser. På grund av ett åsknedslag i juli blev mätsystem B satt ur funktion till i början av november innan mätsystemet var helt åtgärdat.

4. SLUTSATSER FRÅN UNDERSÖKNINGEN

Resultatet från projektet visar att det är tekniskt möjligt att utnyttja de mycket stora mängder värmeenergi som varje år lagras upp i våra sjöar och vattendrag. Utvinningen kan göras på ett ekonomiskt och miljömässigt försvarbart sätt.

Då det rör sig om lågtempererad energi är det naturligtvis önskvärt att energin används vid så låg temperatur som möjligt för att erhålla en god värmefaktor. Eftersom en stor del av kostnaderna för utvinning av den här energikällan är fasta kostnader bör driftprofilen på avnämarsidan vara sådan att energianläggningen får gå med full effekt under så stor del av året som möjligt.

4.1 HUR STOR DEL AV DEN FRÅN VATTENDRAGET UT- TAGNA ENERGIN UTGÖRS AV ENERGI FRÅN VATT- NET, BOTTEN ELLER FRIGJORD ENERGI VID ISBILD- NING PÅ ENERGIUPPTAGAREN

Under innevarande vintersäsong 1981/82 liksom under vintersäsongen 1980/81 utgjorde isbildningsvärmets vid påfrysning av värmeväxlare och transportledning cirka 25 % av från mark och vattendrag totalt upptagen energi.

Vid proven har den sjöbottenförlagda ej nedgrävda värmeväxlaren använts.

Energiupptagningen har gjorts kontinuerligt dygnet runt. 1980/81 gjordes den här typen av mätningar under perioden 1980-11-12--1981-04-04. Under 1981/82 har hittills mätningar gjorts under perioden 1981-10-29--82-02-12. Om mätningar görs med full värmelast under hela årscykeln blir den procentuella andelen isbildningsvärme mindre än 25 %.

Vattnets temperatur, strömningsförhållanden i vattendraget samt uttagen effekt per meter rör inverkar på mängden is på den energiupptagande anordningen.

Ispåväxten sker till en viss gräns ut från det energiupptagande röret vid konstant effektuttag. Följande resonemang ger bakgrunden till varför jämvikt uppstår vid ispåväxt nedåt i botten-sedimenten.

Tre meter ned i botten-sedimenten inträffar temperaturmaximum i januari - mars varje år. Detta gäller vid naturlig energiom-sättning. Våra mätningar visar att temperaturen är relativt stabil på tre meters djup i sedimenten under ett rör med cirka 30 W/m effektuttag. I början av förloppet innan jämvikt har uppnåtts växer iscylindern radiellt nedåt i botten-sedimenten. Vi får då en nollgradig isfront som rör sig nedåt i botten-sedimenten.

Eftersom temperaturen tre meter ned i sedimenten är stabil kommer temperaturgradienten i de ofrusna botten-sedimenten att växa. Vid jämvikt, det vill säga när ispåväxten har upphört, transporteras lika stor mängd energi bort från isfronten in mot det energiupptagande röret som isfronten tar upp från sedimenten.

Ökas effektuttaget i röret blir den av isfronten från sedimenten upptagna effekten för liten. Extra energi tas då upp i form av isbildningsvärme. Iscylindern växer, isfronten rör sig nedåt i sedimenten, temperaturgradienten växer och tillräcklig mängd energi tillförs isfronten för att balansera det ökade effektuttaget i röret och en ny jämvikt etableras.

Temperaturen förefaller vara förhållandevis stabil vid varierande effektuttag från bottensedimenten. Följande förhållande ger en del av förklaringen till detta.

$$q = \frac{\sum \Delta t_i}{\sum R_i} = \frac{\Delta t}{R}$$

$$R \text{ kan skrivas } \frac{\ln \frac{x_2}{x_1}}{k_a} + \frac{\ln \frac{x_3}{x_2}}{k_b} + \frac{\ln \frac{x_4}{x_3}}{k_c}$$

Där: q = uttagen effekt
 Δt = total temperaturdifferens
 R = totalt värmemotstånd
 k = värmeledningstal

Index a avser rörväggen
 Index b avser iscylindern
 Index c avser den ofrusna bottensedimenten

x_1, x_2 etc är de olika kropparnas mantelytors radier.

$$k_c < k_b$$

Vid ökat effektuttag växer iscylindern radiellt utåt.

Den sista termen i R kan idealt sägas förändras från

$$A = \frac{\ln \frac{x_4}{x_3}}{k_c} \text{ till } B = \frac{\ln \frac{x_4}{x_3 + \Delta x_3}}{k_c} + \frac{\ln \frac{x_3 + \Delta x_3}{x_3}}{k_b}$$

differensen $B - A$ blir

$$\ln \left(1 + \frac{\Delta x_3}{x_3} \right) \left(\frac{1}{k_b} - \frac{1}{k_c} \right) < 0$$

$$\text{ty } k_c < k_b$$

alltså minskar R vid ökande effektuttag. Detta innebär i sin tur att Δt ej behöver öka så mycket som om värmemotståndet R hade varit konstant eller ökande vid ökat effektuttag.

Förutsättningen att temperaturen är konstant på tre meters djup i sedimenten gäller naturligtvis ej för extremt höga effektuttag per ytenhet av bottensedimenten.

Det skall också sägas att densitetsströmningar i vattnet runt isfronten i bottensedimenten kan bidra med en större eller mindre del av det totala energiflödet till isfronten.

Det här avsåg den del av iscylindern som ligger nere i botten-sedimenten. För den del av iscylindern som ligger ovanför botten-sedimenten uppe i vattenvolymen inträder också ett jämviktsläge när iscylinderns radie har uppnått en viss storlek. Ett visst effektuttag motsvaras av en viss iscylinderradie. Den radiens storlek är beroende av vattentemperaturen och de strömnings-förhållanden som gäller för den aktuella vattenvolymen.

Turner (1973) anger att relationen mellan värmeflödet genom termisk konvektion och värmeflödet genom ren värmeledning är proportionell mot $(\Delta \rho H^3)$ $1/4$. Höjden H är i det här fallet radien hos den del av iscylindern som befinner sig i vattnet ovanför bottensedimenten.

Innan jämvikt har uppnåtts kommer energiflödet till plaströret att överstiga energiflödet till iscylindern från omgivande vatten. Temperaturen sjunker därvid i iscylindern och isfronten växer ut. Iscylinderns radie och därmed H växer. Värmeflödet växer därvid enligt sambandet ovan. När iscylinderns radie och därmed H har nått en viss storlek uppnås balans mellan tillförd och bortförd energi i isfronten.

Temperaturen i vattnet 0,15 m upp från botten är $+0,44^{\circ}\text{C}$.
Temperaturen i sedimentytan är $+1,47^{\circ}\text{C}$.

På ett av de energiupptagande rören mäts temperaturen uppe på röret och under röret. Temperaturdifferensen mellan mätpunkterna ligger inom felmarginalen.

Det speciella arrangemanget inuti röret ger den här effekten. Eftersom det inre flytande röret i praktiken fungerar som en isolering av det yttre rörets översida kommer den naturliga uppmätta temperaturskillnaden på 1°C mellan över- och under-sidan på röret att kompenseras.

Eftersom plaströrets yttre yta har i det närmaste samma temperatur runt om kommer begränsningsytans utformning hos iscylindern att ge en antydning om energiflödet utseende in mot plaströret i iscylindern, se figur 4.1.

Eftersom plaströrets utsida och iscylinderns utsida utgör två isoterma ytor kan, med utgångspunkt från avståndet mellan iscylinderns yttre begränsningsyta och plaströrets utsida i de olika sektorerna, följande noteras.

Det förefaller som om energiflödet skulle vara störst i sektor A och minst i sektorerna C medan sektor B har ett flöde någonstans däremellan. Detta kan tyvärr ej fastläggas med någon större noggrannhet trots att upprepade mätningar och observationer alltid synes visa den här tendensen. Infruset sedimentmaterial i sektor A kan inverka på resultatet. Higashi (1953) visar dock att en långsam frysning, som resulterar i vattenhalter som över-skrider mättningsgränsen, ger värmeledningstal som närmar sig den rena isens.

Sammanfattningsvis kan sägas att av det totala energiuttaget under vinterhalvåret utgörs cirka 25 % av isbildningsvärme, cirka 40 % av energi från bottensedimenten och cirka 35 % från vattenvolymen. Dessa värden torde dock kunna variera i betydande grad beroende på utformning och dimensionering av de energi-upptagande anordningarna, vatten- och sedimenttemperaturer, strömningsförhållanden, effektprofiler etc.

Direkt efter isläggningen på hösten är vattentemperaturen i många av våra vattendrag nere i $+0,3$ till $0,5^{\circ}\text{C}$. Sedimentens temperatur är i ytan cirka $1,0 - 1,5^{\circ}\text{C}$ och på 3 meters djup cirka 6°C .

De låga vattentemperaturerna gör att plaströret mycket snart blir isbelagt. Om ispåväxten sker nedåt erhålles följande fördelar. K-värdet ökar och isen kan vid vissa typer av bottnar binda sedimentmaterial, sten etc och därigenom ge viss förankringseffekt. Sker ispåväxten uppåt försämras k-värdet samtidigt som flytkraften i rörsystemet ökar.

Genom att införa en viss isolering uppåt i rören har vi försökt styra isbildningen nedåt i bottensedimenten.

Isoleringen har utförts i form av ett perforerat rör som flyter i vätskan och ligger an mot ytterrörets inre periferi. Flödet är noll i det inre röret. Genom att dimensionera flödet så att strömningen blir turbulent i de vidare partierna och laminär i de trängre partierna i mellanrummet mellan ytterröret och innerröret blir k-värdet nedåt större än k-värdet uppåt.

Genom det här utförandet fås en osymmetrisk temperaturfördelning i rörets tvärsnittsarea. Vätskeflödet tvingas ned mot botten i rörtvärsnittet och kan kompensera temperaturdifferensen mellan yttre översida och undersida av plaströret. Vid jämförelse med rör utan det här arrangemanget fås högre returtemperaturer med det här arrangemanget. Isbildningen tränger också djupare nedåt i bottensedimenten och minskar uppåt.

4.2 INVERKAN PÅ VATTENTEMPERATUREN

För att få svar på en ofta framställd fråga "hur inverkar ett större värmeuttag på vattentemperaturen i Storsjön" vände jag mig till avdelningen för Vattenteknik vid tekniska högskolan i Luleå. Kenneth Häggkvist gjorde ett beräkningsexempel över vattentemperaturförändringen vid ett effektuttag på 114 MW under 5,5 vintermånader från Storsjön. Se appendix 2. Det motsvarar den sammanlagda effekten för värme och varmvatten till 20 000 hushåll.

Beräkningarna grundar sig på vattentemperaturmätningar i Storsjön utförda 1981-02-25--27 se figur 4.2.

Ovanstående effektuttag skulle medföra en temperatursänkning på $0,1^{\circ}\text{C}$ jämfört med den normala temperaturen räknat på hela Storsjöns ytan. Storsjöns yta är 456 km^2 . Det utgör cirka 0,6 % av totalt tillgänglig vattenareal för värmeutvinning i landet.

I den här beräkningen har hela energimängden tagits från temperatursänkning av vattnet och eventuellt viss lokal ökning av istäckets tjocklek. Om en del av energin kan antagas komma från bottensedimenten och påfrysning av de energiupptagande rören skulle vattentemperaturförändringen bli mindre än den redovisade.

4.3 FÖRANKRING

4.3.1 Fastfrysning

Vid lämplig botten av fast material eller blockbunden botten kan förankringen av plaströren ske genom fastfrysning i botten. Följande försök gjordes vintern 1981/82. På botten intill ett av 3 plaströren placerades ett tiotal stenar med volymer från $0,5 \text{ dm}^3$ till cirka 3 dm^3 . Det visade sig att isen växte ut snabbare över dessa stenar än där det inte fanns några stenar. Eftersom granit och gnejs till exempel, har en värmeledningsförmåga som är cirka sex gånger större än vattnets bildar stenarna vid fastfrysning i rören köldbryggor i vattnet. Se figur 4.3.1. Vid de låga vattentemperaturer som råder när risk för uppflytning på grund av isbildning på plaströren föreligger sjunker de fastfrysna stenarnas temperatur snabbt under vattnets fryspunkt, och isen breder ut sig över stenarna.

4.3.2 Heat pipes

När bottensedimenten på värmeväxlarens förläggingsplats består av dy eller material som vid frysning har en densitet understigande vattnets behövs speciella förankringsanordningar. Vid stora anläggningar kan iscylindrar med diametern en meter och mer befaras uppstå runt plaströren. För att motverka den flytkraften krävs cirka 50 dm^3 betong per meter värmeväxlarrör. Eftersom den här betongen skall appliceras på ett sjöbottenförlagt plaströrssystem blir kostnaden orimlig.

Provanläggningens sjövärmeväxlare är delvis förankrad med hjälp av heat pipes så kallade värmerör.

Det är isoterma byggelement som bland annat har använts i rymdsammanhang. Utmärkande för dessa värmerör är deras höga värmeledningsförmåga i en riktning. Genom att föra ned värmerör i bottensedimenten och ansluta dem till plaströren kan en effektiv förankring ske av plaströren.

Det här metallröret är lätt att trycka ner i den typ av botten där extra förankring krävs. Om det vore ett vanligt metallrör vore det ju naturligtvis lika lätt att dra upp det igen. I det här fallet blir dock förankringen mycket god. Orsaken till detta är följande.

När det bildas is på plaströret på vattendragets botten bildas även is på den övre delen av det i plaströret fastgjorda heat piperöret. Eftersom ett heat piperör är en isoterm enhet fryser heat piperöret fast djupt nere i de bottenlager som omger heat piperörets nedre ände.

Följande konstaterande kan göras.

- Där vattendragets botten är sådan att extra förankring krävs kan heat pipes lätt anbringas och föras ned i botten.
- Där bottenförhållandena är sådana att heat pipes är svåra att föra ned i botten krävs ofta ingen extra förankring. Plaströren kan frysa fast i den steniga eller hårda botten.
- När förankring görs med heat pipes överförs en ansevärd mängd energi via dessa utmärkta ledare från heat pipe-enhetens nedre ände till det fastgjorda plaströret. Eftersom heat piperöret lätt kan tryckas 3 till 5 m ned i en dybotten förbinds dessa sedimentlager termiskt och mekaniskt med de energiupptagande plaströren på vattendragets botten. Vid 3 till 5 m ned i bottensedimenten erhålls ett tidsfördröjt temperaturmaximum i mitten av februari varje år. Den termiska förbindelsen mellan detta sedimentlager och plaströren bidrar därför till att höja temperaturen hos den sjöförlagda värmeväxlaren under vinterhalvåret.

4.3.2.1 Tjalsäkrade förankringspunkter

Den här förankringen fungerar utmärkt vid jämnt energiuttag från värmeväxlaren. Komplikationer kan uppstå vid längre drifts-avbrott om värmerören därvid tinar loss nere i botten. Vid normala förhållanden är som tidigare sagts vintertid bottenvattnet mycket kallare än de sedimentlager som omger det fastfrusna värmeröret. Det är därför viktigt att dimensionera och arrangera dessa värmerör så att isvolymen runt värmeröret nere i bottensedimenten inte smälter undan förrän under sommarhalvåret då bottenvattnet har sådan temperatur att värmeväxlaren är isfri och utan flytkraft. Det torde inte upplevas som någon större miljömässig olägenhet om man punktvis 3 - 5 meter ned i bottensedimenten får kvardröjande is under större delen av sommaren. Isen närmare sedimentytan smälter undan mycket snabbt vid inversionen under våren.

Man kan lätt härleda sambandet

$$T_y - T_i = (T_y - T_{i0}) e^{-kx}$$

Som visar hur T_i , den inre temperaturen i rörsystemet, varierar utefter rörens längd. T_y är det omgivande mediets temperatur. Konstanten K är beroende av logaritmiska medelvärdet av rörens ytter- och innerdiameter, värmegenomgångstalet, värmebärrarflödet, värmebärrarens täthet och specifika värme. På grund av ispåfrysning och andra avvikelser från ett idealt fall blir ett verkligt fall lite mer komplicerat än ovanstående samband. Det kan ändå ge en antydning om att temperaturskillnaden mellan ytter- och innermedia avtar exponentiellt utefter rörets längd.

Eftersom värmerörens förankringsförmåga är beroende av temperaturen bör värmerören anslutas till de delar av rörsystemet där temperaturen är så låg som möjligt. Se figur 4.3.2.1.

Den förankrande isvolymen nere i bottensedimenten måste snabbt anta en sådan volym att tiden för nedsmältning blir längre än smälttiden för de isvolymerna som ger lyftkrafter uppe i det energiupptagande rörsystemet. Genom att sammanföra värmerören enligt figur 4.3.2.1 blir energiuttaget per volymenhet bottensediment större än om varje värmerör nedföres var för sig med större mellanrum. Det här förfarandet ger därför kraftigare isbildning runt värmerören nere i bottensedimenten. Vid lämplig dimensionering ger det här tjäle och därmed förankringspunkter hela året nere i bottensedimenten. En god säkerhetsmarginal kan därför uppnås med den här förankringsmetoden.

4.4 DRIFTSÄKERHET

För att uppnå ett gott produktionsresultat och god ekonomisk avkastning på en given investering krävs normalt en god systemprestation och en god personalprestation. Detta gäller även värmeanläggningar baserade på energi från sjöar och vattendrag.

För att erhålla den önskvärda systemprestationen bör systemet ha tekniskt optimal prestation samt en optimal driftsäkerhet. Ett värmesystem baserat på en ny energikälla måste uppvisa god driftsäkerhet om det skall kunna hävda sig i konkurrens med värmesystem baserade på olja eller enbart el. Det här förhållandet accentueras också av det faktum att ett sjövärmebaserat värmesystem har högre investering per installerad kW uteffekt än till exempel värmesystem baserade på olja och el.

Driftsäkerheten är alltså en mycket viktig faktor i det här sammanhanget. Hög driftsäkerhet kan erhållas om systemet har hög funktionssäkerhet, god underhållsmässighet och god underhållssäkerhet.

4.4.1 Funktionssäkerhet

Funktionssäkerheten hos systemet är bland annat beroende av följande faktorer och hur felintensiteten påverkas av dem.

4.4.1.1 Vattentemperaturen

Systemet bör vara så utformat att det fungerar och ger full uteffekt även vid ispåfrysning på de energiupptagande delarna.

4.4.1.2 Föroreningar i vattnet

Systemet bör vara utformat så att det fungerar och ger full uteffekt även om vattendragets vatten är förorenat eller på annat sätt har låg kvalitet. Systemet skall vara utfört så att full uteffekt kan erhållas trots eventuella avlagringar på rörsystemet.

4.4.1.3 Bottenförhållanden

Systemet bör vara utformat så att det kan användas i vattendrag med olika bottenförhållanden. Helst skall systemet kunna utformas så att det förmår utnyttja fördelarna med till exempel dybottnar, ler- och sandbottnar samt blockbundna bottnar.

4.4.1.4 Effekttålighet

Systemet bör vara utformat så att det tål överbelastning utan funktionsbortfall under längre perioder av sträng kyla eller eventuellt bortfall av annan kompletterande energikälla.

4.4.1.5 Komplexitet i svår miljö

Systemet bör vara av passiv konstruktion och så enkelt som möjligt för att få goda förutsättningar för en låg felintensitet.

4.4.1.6 Känslighet för mekaniska skador

Systemet bör om möjligt vara utformat så att sannolikheten för mekaniska skador minimeras. Där det ej är möjligt att åstadkomma detta bör systemet byggas så att vissa skador kan tolereras utan att systemets funktion och förmåga att ge full effekt påverkas.

4.4.2 Underhållsmässighet

Systemet bör vara utformat så att felsökningstid och reparations-tid minimeras.

4.4.3 Underhållssäkerhet

Systemet bör vara uppbyggt så att reservdelshållning, personalutbildning och dokumentation underlättas.

4.5 MILJÖASPEKTER

Rätt utförda borde sjövärmesystem gå att förena med ett friskt och normalt fungerande akvatiskt ekosystem. I vattendrag där vattentemperaturen normalt ligger under $+1^{\circ}\text{C}$ vintertid blir temperaturförändringen mycket liten totalt sett.

En viss sänkning av sdiementtemperaturen minskar aktiviteten hos bakterierna i sedimentytan vilket minskar hastigheten hos de nedbrytande processerna. Detta minskar behovet av syre vilket skulle kunna förbättra situationen i vattendrag med syrebrist.

Naturvårdsenheten vid länsstyrelsen i Jämtlands län gjorde under januari 1981 provtagningar på botten dels vid iscyldrarna runt de energiupptagande rören och dels i två referenspunkter för att se om bottendjuren hade påverkats av energiuotaget i området.

Resultatet var entydigt. Nedkylningen av botten har inte påverkat bottendjuren. Hade det varit för kallt för dem hade de vandrat därifrån. Det har de inte gjort. Det finns ingen signifikant skillnad mellan proven tagna vid iscyldrarna och proven tagna i referenspunkterna. Undersökningen är liten men hade nedkylningen varit ogynnsam borde det enligt naturvårdsenhetens limnologiske expert ha märkts redan på det här enkla provet.

Ett villkor för att undvika ogynnsam inverkan på bottendjuren är dock att det mellan iscyldrarna runt rören finns ofrusen botten-sediment. Större sammanhängande isområden bör ej tillåtas uppstå i botten-sedimenten.

Som köldbärare i rörsystemet är saltlösning tekniskt, ekonomiskt och miljömässigt att föredra framför glykollösning. Kalciumklorid och natriumklorid är biologiskt inaktiva substanser. Ett eventuellt läckage i rörsystemet med därav föranlett utflöde av saltlösning i vattendraget skulle följaktligen inte medföra några allvarigare miljömässiga konsekvenser.

4.6 JÄMFÖRELSE MELLAN NEDGRÄVD OCH ICKE NED-GRÄVD SJÖVÄRMEVÄXLARE

Under tre vintersäsonger 1979-12-07--1980-04-03, 1980-11-12--1981-04-04 och 1981-10-29--1982-02-12 har asfaltytan i provanläggningen värmts med energi från Storsjön. Under vintern 1979-1980 användes den i sjöbotten nedgrävda rörvärmeväxlaren. Vintersäsongerna 1980-1981 och 1981-1982 användes den på sjöbotten förlagda värmeväxlaren. Lägsta inkommande värmebärartemperatur från den nedgrävda värmeväxlaren var $-4,0^{\circ}\text{C}$. Motsvarande lägsta temperatur för den på sjöbotten förlagda värmeväxlaren var $-1,8^{\circ}\text{C}$.

Den mest sannolika förklaringen till den lägre temperaturen för den nedgrävda värmeväxlaren är det faktum att vattenståndet i Storsjön varje vinter sjunker så att strandytan där rören är nedgrävda blir torrlagd i mars. Under december och januari var den inkommande temperaturen från den nedgrävda värmeväxlaren cirka $0,5^{\circ}\text{C}$ lägre än för den på botten förlagda värmeväxlaren. Under den tiden var det mellan 1 m till 2,5 m vatten över den nedgrävda värmeväxlaren. Skillnaden i temperatur här beror sannolikt på att utförandet med ett inre rör, se punkt 2.1.2.1, ger bättre värmeöverföring till det energibärande mediet än om ett enkelt rör används. Noteras bör att den nedgrävda värmeväxlarens 1 000 m rör motsvarades av 830 m för den på botten förlagda värmeväxlaren. Vid samma mängd värmeväxlarrör i båda värmeväxlarna blev den inkommande temperaturen från den på botten förlagda värmeväxlaren $1,0$ till $1,5^{\circ}\text{C}$ varmare än från den nedgrävda.

4.7 ASFALTYTA SOM SOLFÅNGARE

Under tiden 1980-05-21--09-12 och 1981-06-27--07-31 utnyttjades asfaltytan, se punkt 2.1.6, som solfångare eller solväxlare.

Den från asfaltytan uttagna medeleffekten uppgick till $18 + 2 \text{ kW}_2$. Eftersom den för värmeupptagning utnyttjade asfaltytan är 200 m^2 stor blir effektuttaget 90 W/m^2 .

Asfaltytan ligger öppen för solinstrålning.

Som exempel kan nämnas att lägsta temperaturen hos köldbäraren var, vid utloppet från värmepumpens förångare, $-4,1^{\circ}\text{C}$. Asfaltytans temperatur var som kallast det dygnet, 1981-07-06 kl 03:42:24 vt, $+4,4^{\circ}\text{C}$. Det hade då bildats kondens på asfaltytan. Kl 07:42:24 vt samma dygn hade temperaturen stigit till $19,9^{\circ}\text{C}$ i asfaltytan. Högsta temperaturen som noterades det dygnet för asfaltytan var $+35,4^{\circ}\text{C}$ kl 13:42:24 vt. 1981-07-05 var en regnig dag med $15,1^{\circ}\text{C}$ lufttemperatur. 1981-07-06 var en solig dag med $21,5^{\circ}\text{C}$ lufttemperatur.

Vid tillräcklig kyleffekt, för sänkning av asfaltytan ned mot 0°C dygnet runt, skulle naturligtvis medeleffektuttaget kunna höjas till betydligt över 90 W/m^2 asfaltyta under sommarhalvåret.

Man skulle då, vid en relativ luftfuktighet större än 50 %, få ett extra energitillskott från kondensutfällning på asfaltytan under större delen av dygnet vid normala sommartemperaturer.

4.8 AVISNING AV ASFALTYTA

Som angivits i inledningen startades det här projektet ursprungligen upp för att prova en alternativ metod att förhindra halka på landningsbanor. Den vanligaste metoden att förhindra halka är idag att sprida ett kvävegödselmedel med benämningen UREA på våra landningsbanor.

Ansvariga för fälthållning inom försvaret har gjort bedömningen att alternativa metoder för halkbekämpning måste finnas i beredskap om miljöförhållningarna begränsar möjligheten att använda UREA. Därför gjordes den här satsningen på prov med uppvärmning av asfaltytor. I förutsättningarna för proven angavs att fullgod friktion skulle genereras utan användning av maskiner utrustade med hårdmetallskär eller stålborstar. Snöröjningsutrustning som plogar, våghyvlar och snöslungor försedda med hårdmetallskär kan försämra makrostrukturen hos toppbeläggningen på våra landningsbanor. Sopblåsmaskiner utrustade med stålborstar polerar så småningom fram en mycket slät mikrostruktur på banytans beläggningssmaterial. Dessa faktorer ger ökad risk för halka och vattenplaning även under sommarhalvåret.

Genom att värma asfaltytan kan halka på grund av is och snö på landningsbanan undvikas. Eftersom den uppvärmda asfaltytan möjliggör övergång från hårdmetallskär och stålborstar till hårdgummiskär och plastborstar på fälthållningsutrustningen förbättras friktionsegenskaperna hos banbeläggningen. Detta ger högre friktionsvärden även sommartid. Det ger även ökad livslängd åt banbeläggningen.

Under tre vintrar har enligt punkt 4.6 asfaltytan i provanläggningen värmts med energi från Storsjön.

Den för asfaltytans uppvärmning, från värmepumpen levererade, medeleffekten uppgick till $29 \text{ kW} + 3 \text{ kW}$. Det blir en medeleffekt på 145 W/m^2 asfaltyta.

Den effekten har varit tillräcklig för att ge god friktion enligt givna förutsättningar på asfaltytan. Asfaltytan har alltid haft fullgod friktion ($\mu > 0,7$) när plogning och sopning har utförts vid snöfall eller snödrev.

Asfaltytan har haft fullgod friktion 90 % av drifttiden helt utan snöröjning. Normalt har asfaltytan varit torr och ren.

De svåraste driftfallen uppkommer vid snöfall i samband med temperaturer under -10°C eller snödrev.

En intressant iakttagelse har varit att även i de fall då asfaltytan har varit täckt med snö och is har isen lätt kunnat lösas från asfaltytan. Det förefaller vara så att även om inte isen smälter så avdunstar ett tunt skikt närmast asfalten när asfaltytan har förhöjd temperatur i förhållande till den naturliga omgivningstemperaturen.

En annan intressant iakttagelse gjordes under ett längre snöfall vid en lufttemperatur på -23°C . Det hade fallit cirka 120 mm snö när jag åkte ut till provanläggningen för att göra avläsningar. Jag visste att vid -23°C skulle asfaltytans temperatur vara under noll och alltså för låg för att smälta den fallande snön.

När jag kom fram till provanläggningen mätte jag upp cirka 20 mm snö på asfaltytan.

Den fungerade helt naturligt så att när det porösa snötäcket på asfaltytan blev tjockare än cirka 20 mm gav snötäcket så bra isolering att asfaltytans temperatur steg så mycket att snön smälte i samma takt som den föll. När snötäcket blev tunnare än 20 mm blev asfaltytans temperatur för låg för att smälta den fallande snön. Det uppstod en jämnviktssituation vid 20 mm snö på asfaltytan vid -23°C lufttemperatur och det aktuella snöfallets intensitet. Som nämnts ovan var även vid det här tillfället snöskiktet löst så att man med normal snöröjningsutrustning lätt kunde avlägsna snön.

Som framgår av figur 2.1.6.2 har plaströren lagts med två olika djup i asfalten. Det normala lägningsdjupet är 85 mm under asfaltens övre begränsningsyta. I en zon med 2 000 mm bredd har plaströren lagts med 35 mm asfalt ovanför rören.

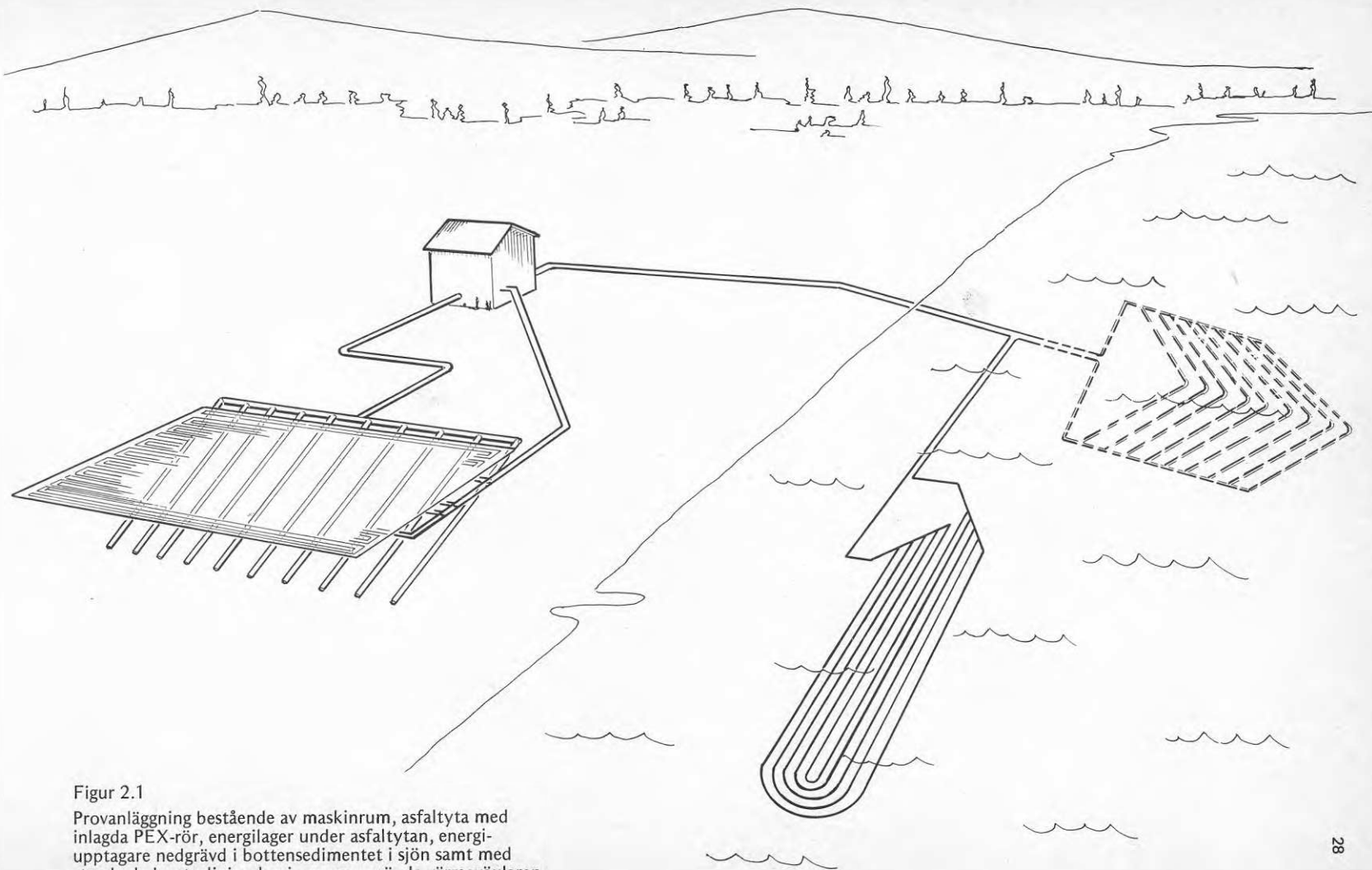
Det har under drifttiden kunnat noteras en betydande skillnad i effekt mellan de olika zonerna.

Vid kraftiga snöfall har alltid zonen med mindre lägningsdjup hållits snöfri längst. Den zonen har också efter kraftiga snöfall vid låg temperatur blivit snöfri flera timmar före den övriga asfaltytan.

Lägningsdjupet 35 mm har dock medfört sprickbildning i asfalten längs plaströren. Någon sådan sprickbildning har ej uppkommit där lägningsdjupet är 85 mm.

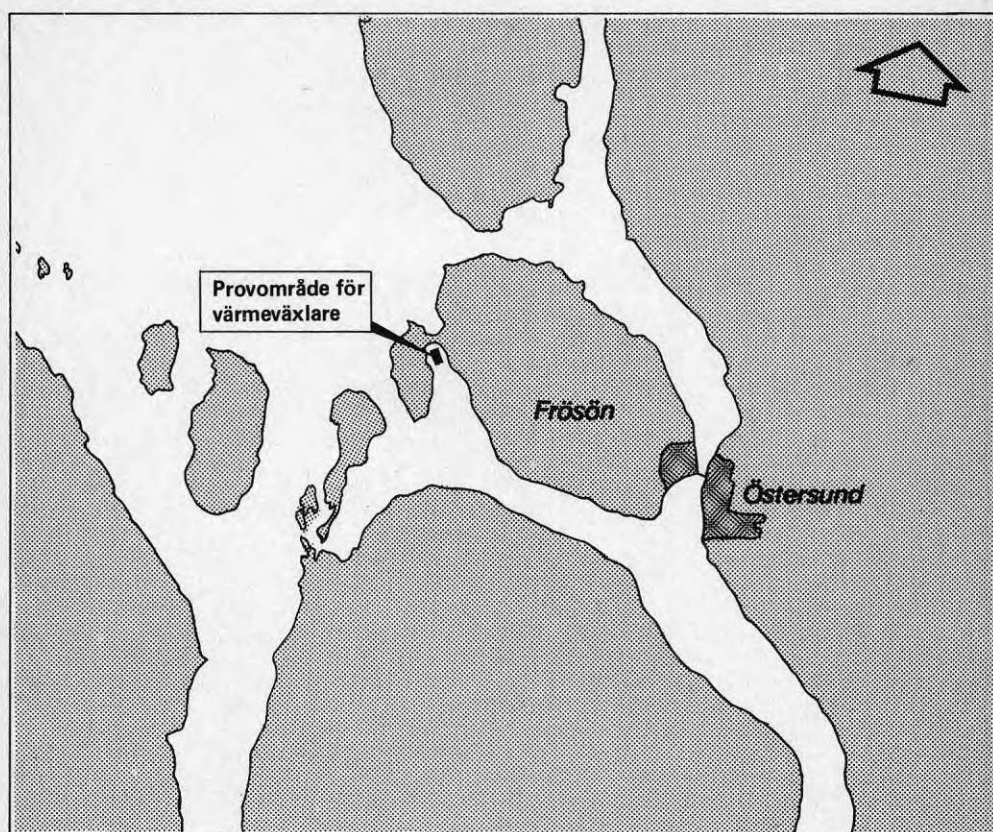
Det vore önskvärt att finna en asfalt med högt värmeledningstal och god hållfasthet mot sprickbildning. Prov med olika asfalttyper och deras egenskaper i samband med temperaturreglering av rullbanor faller utom ramen för den här undersökningen. Luftfartsverket och Statens väg- och trafikinstitut har dock genomfört sådana prov.

En lämplig fortsättning av proven med värmda asfaltytor på flygplatser skulle kunna ge Sverige en ledande position inom det här området. Det finns ännu inga uppvärmda landningsbanor i världen. Högre startvikter och landningshastigheter, krav på bättre säkerhet och tillgänglighet inom flygfarten är argument som i en nära framtid kan skapa en ökad efterfrågan på banvärmesystem.



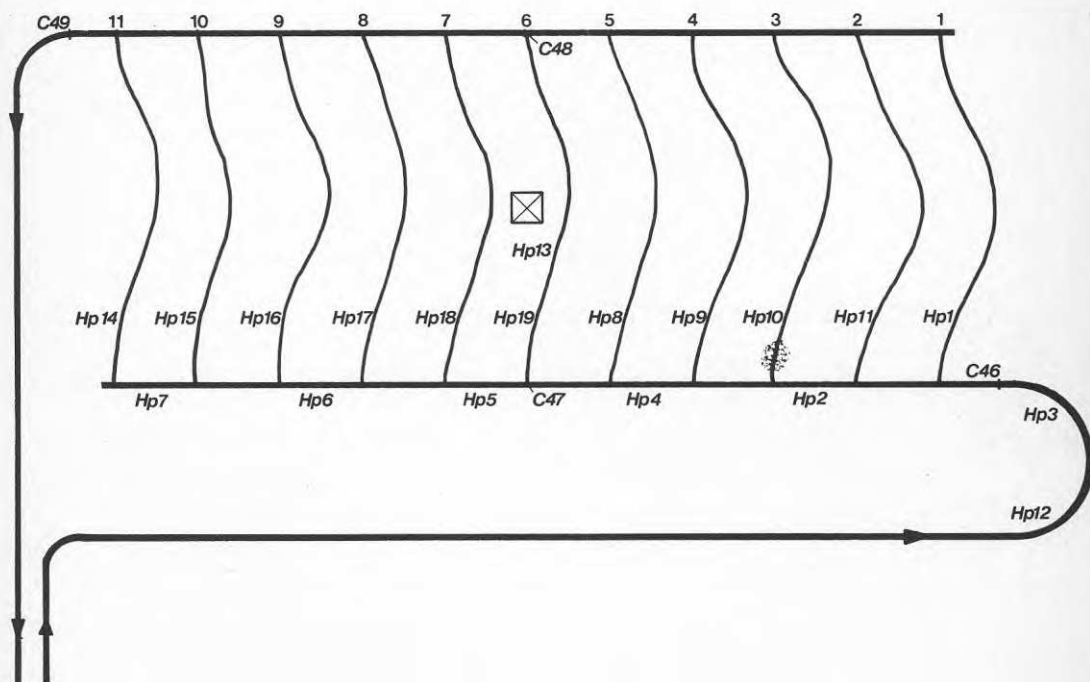
Figur 2.1

Provanläggning bestående av maskinrum, asfaltyta med inlagda PEX-rör, energilager under asfaltytan, energiupptagare nedgrävd i bottensedimentet i sjön samt med streckade konturlinjer den i proven använda värmeväxlaren.



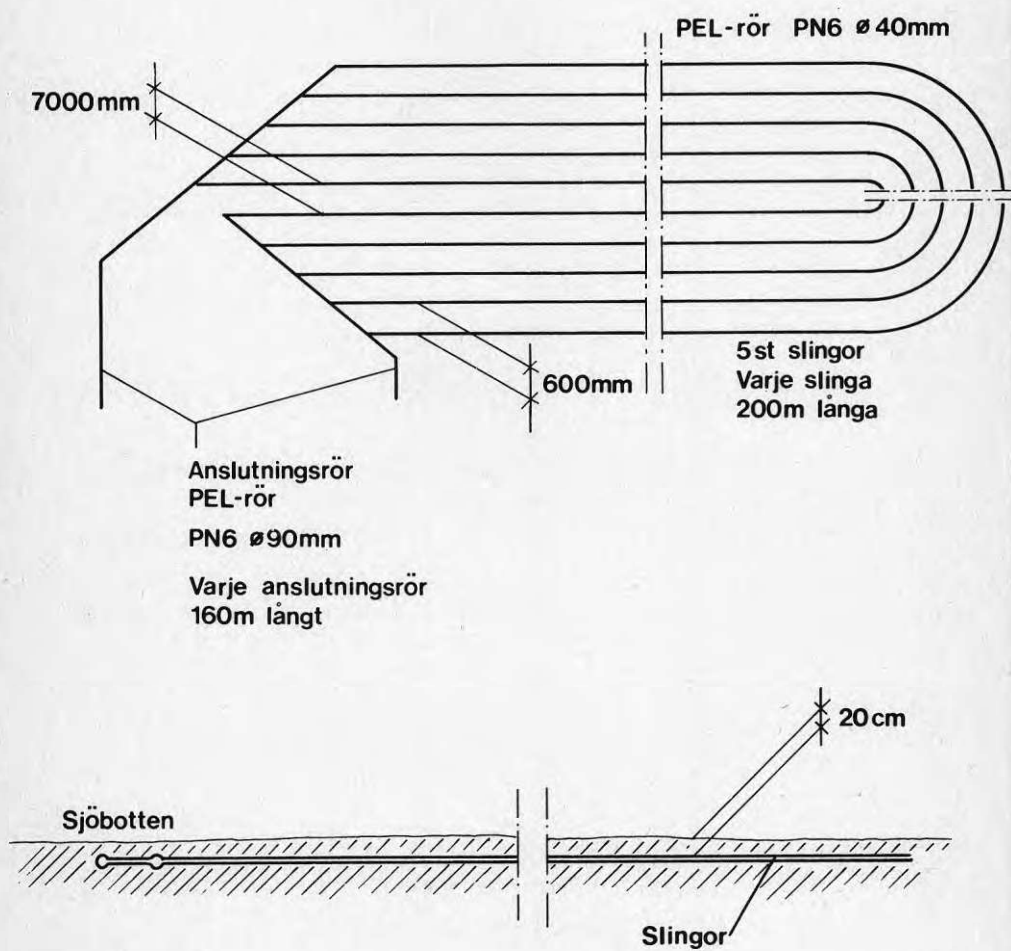
Figur 2.1.1

Värmväxlaren är förlagd i Kungsgårdsviken i Storsjön, Jämtland.

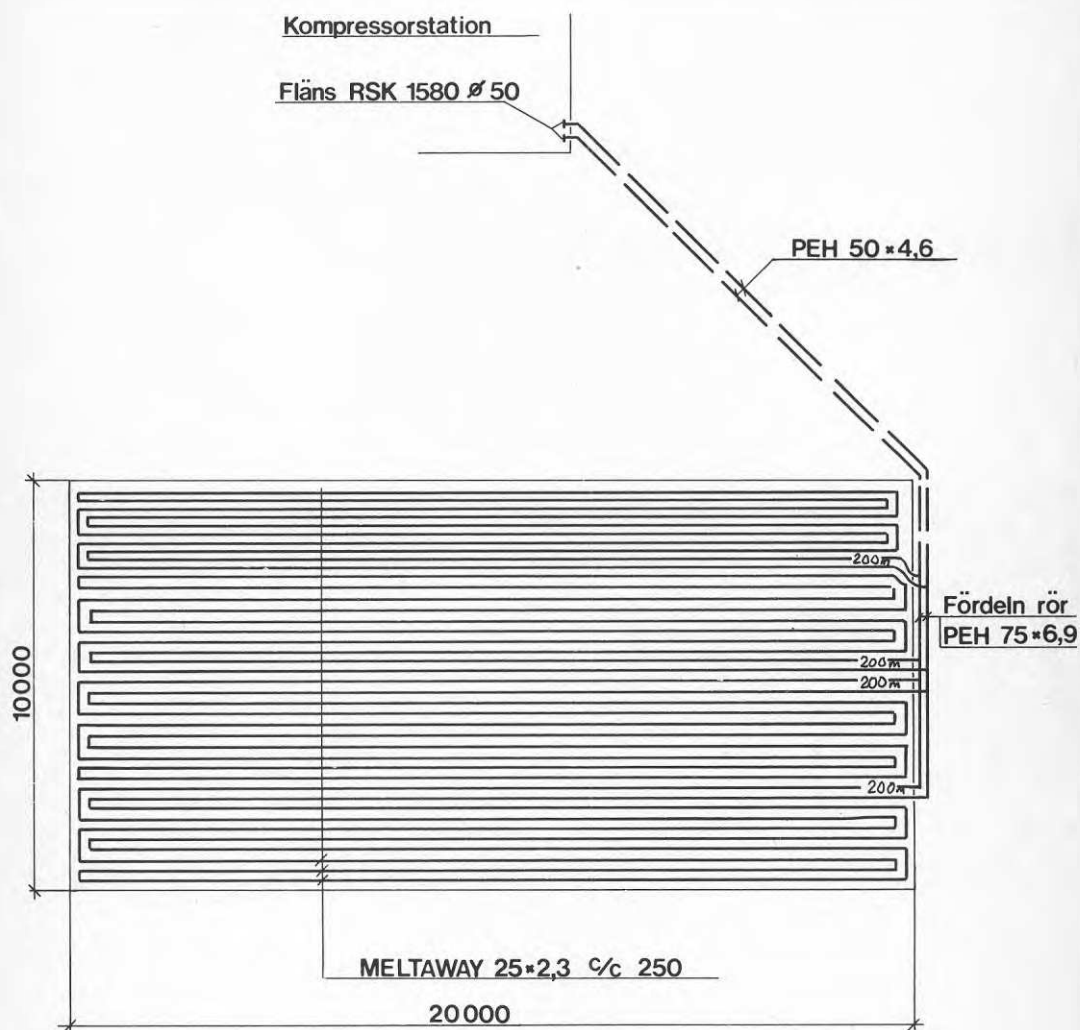


Figur 2.1.2.1

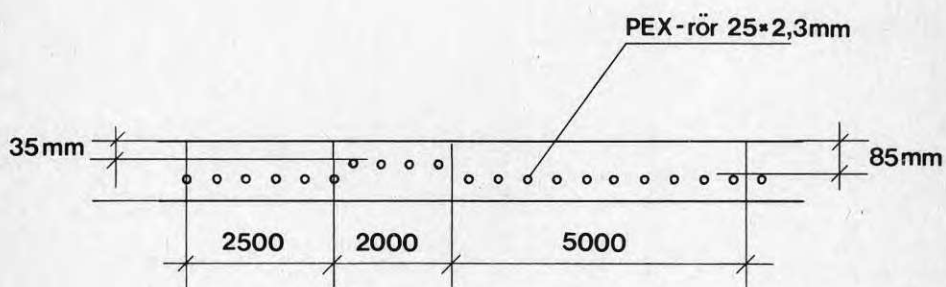
Värmeväxlare förlagd på sjöbotten utan nedgrävning i botten-sedimenten. C46-C49 är temperaturgivare kopplade till data-logger ACUREX ten/10. Hp1 - Hp19 är "heat pipes". I figuren är även mätutrustningens och stenarnas placering inritad.



Figur 2.1.2.2
Energiupptagare nedgrävd i bottensedimenten.

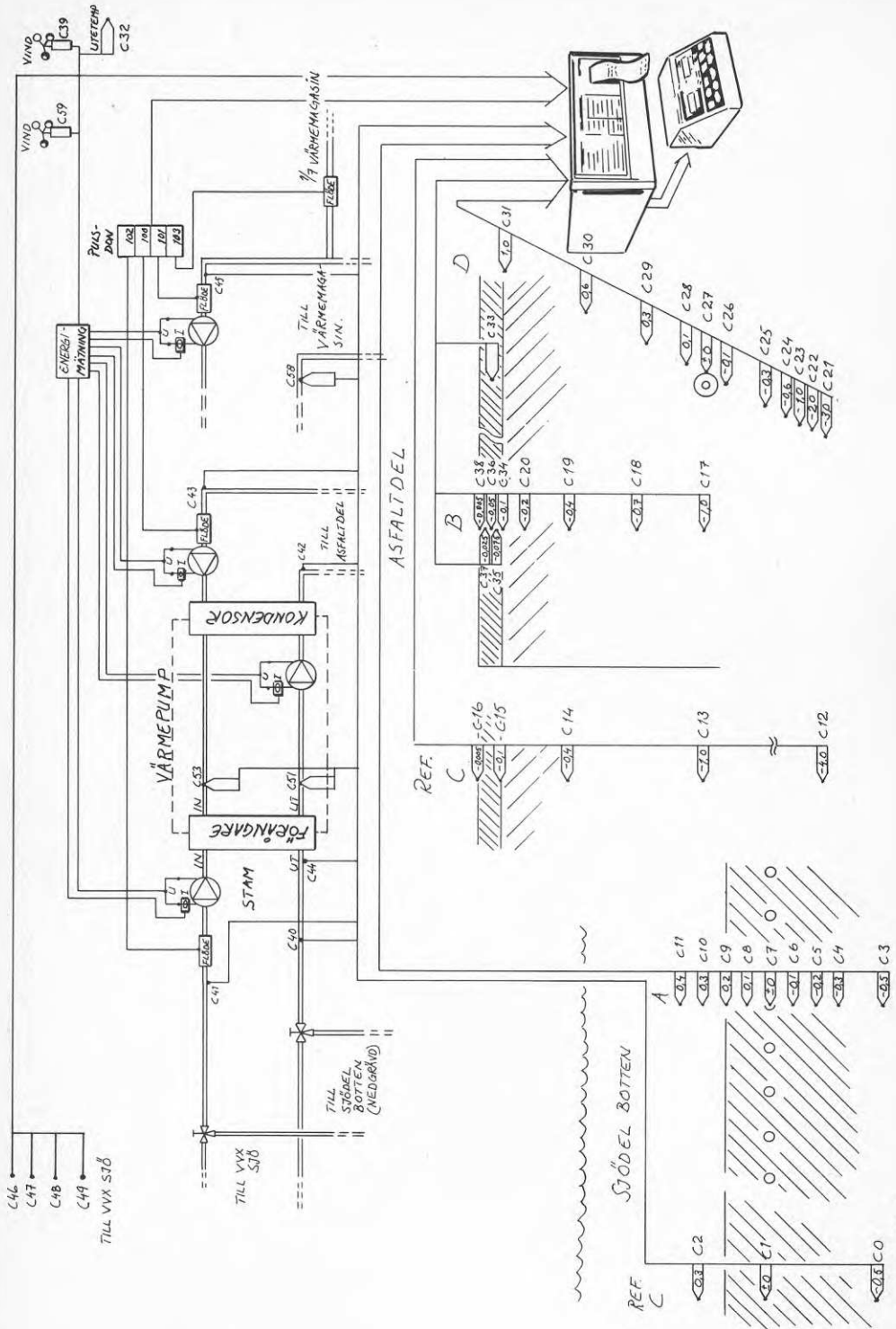


Figur 2.1.6.1
Asfaltyta med PEX-rör.



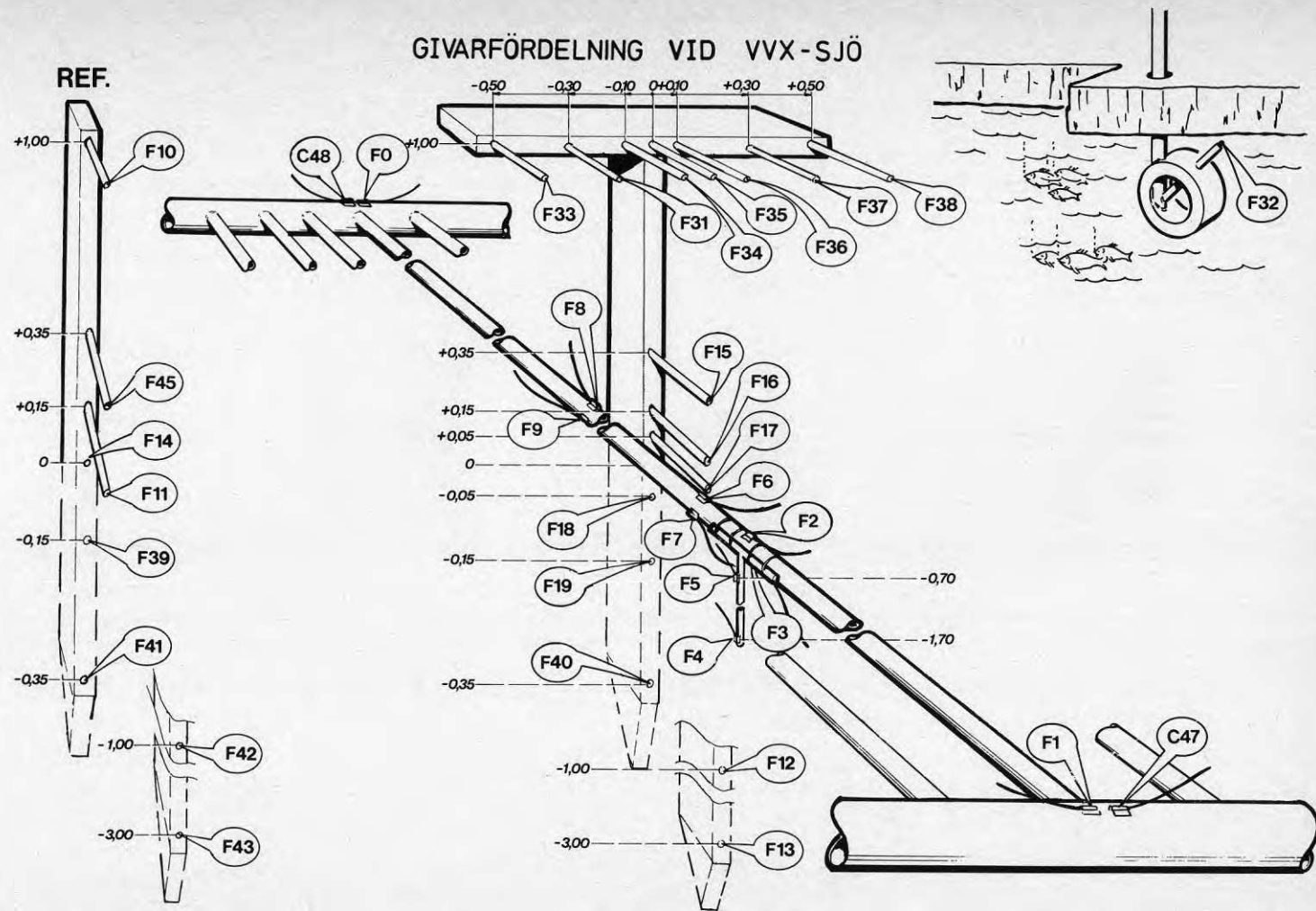
Figur 2.1.6.2

PEX-rör i asfaltytan. Vy från ena ändytan cc-avstånd se figur 2.1.6.1



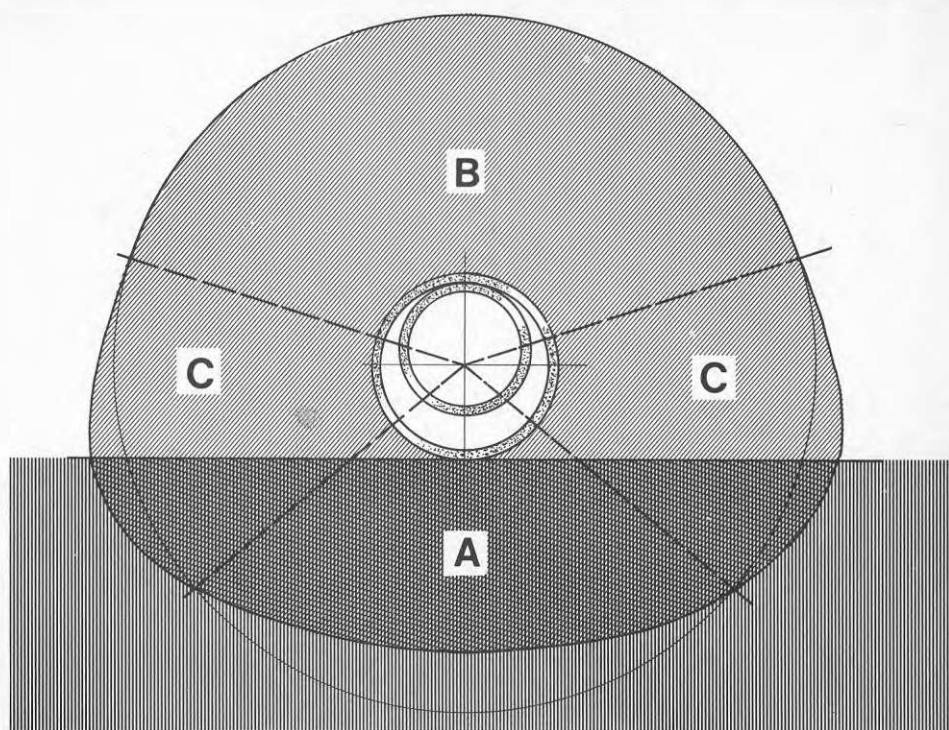
Figur 2.1.8.1

Skiss över ingående mätpunkter för automatisk mätning och registrering. Mätssystem A.



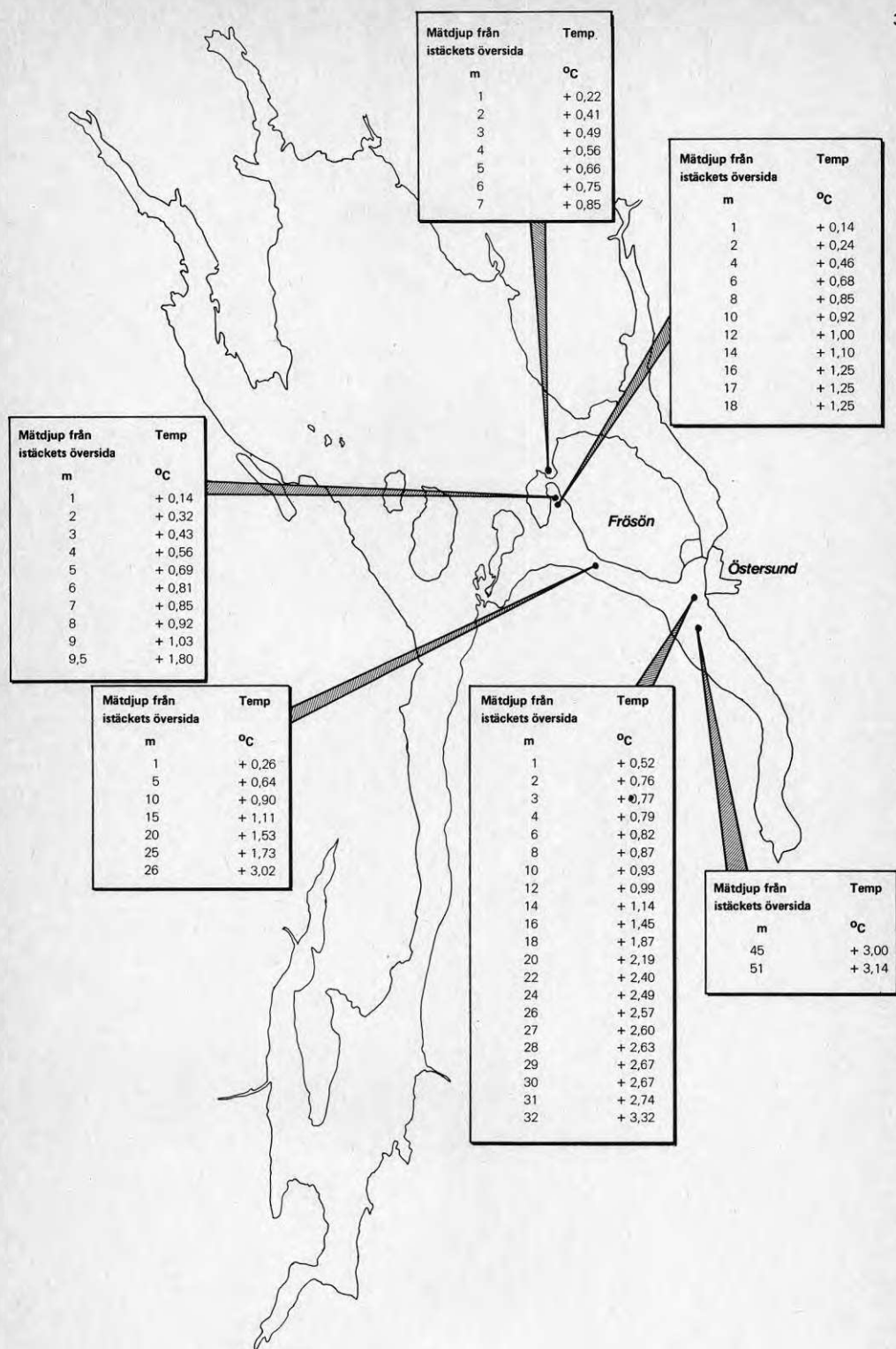
Figur 2.1.8.2

Temperaturgivare vid den ej nedgrävda sjövärmväxlaren anslutna till mätsystem FLUKE Tem Pak. Givarna C47 och C48 är anslutna till mätsystem A.

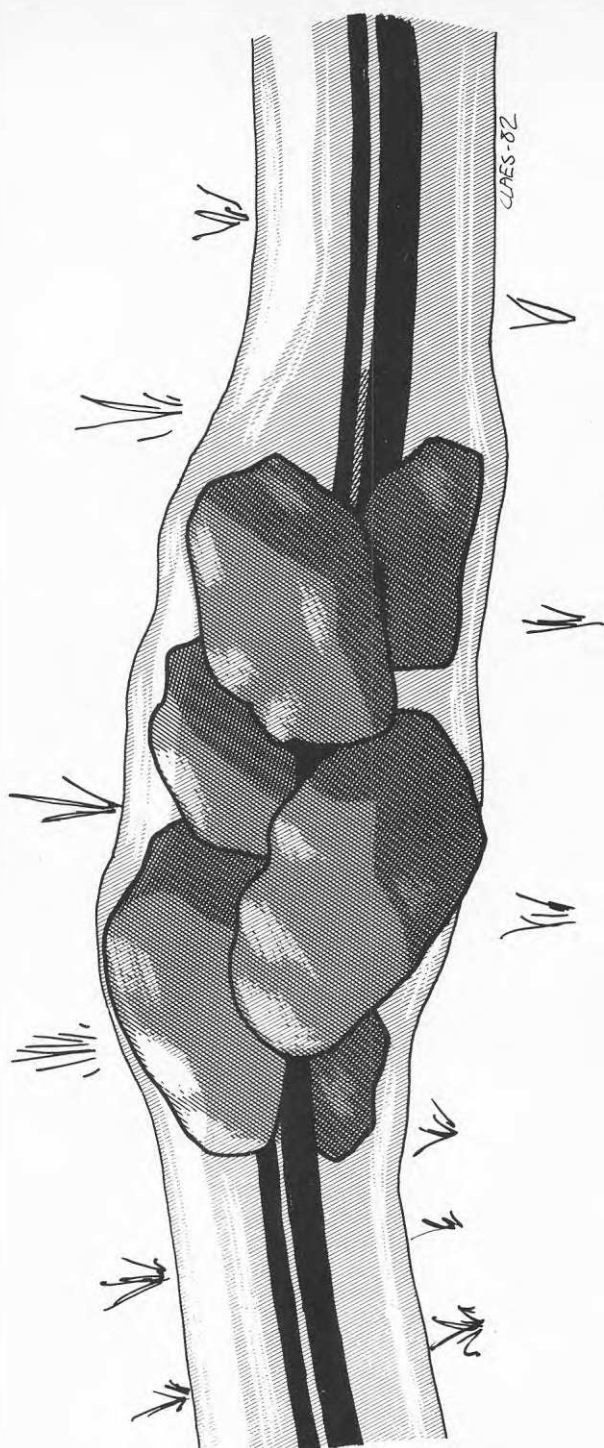


Figur 4.1

Tvårsnittareans utseende hos den kring energiupptagaren påfrusna iscylindern.

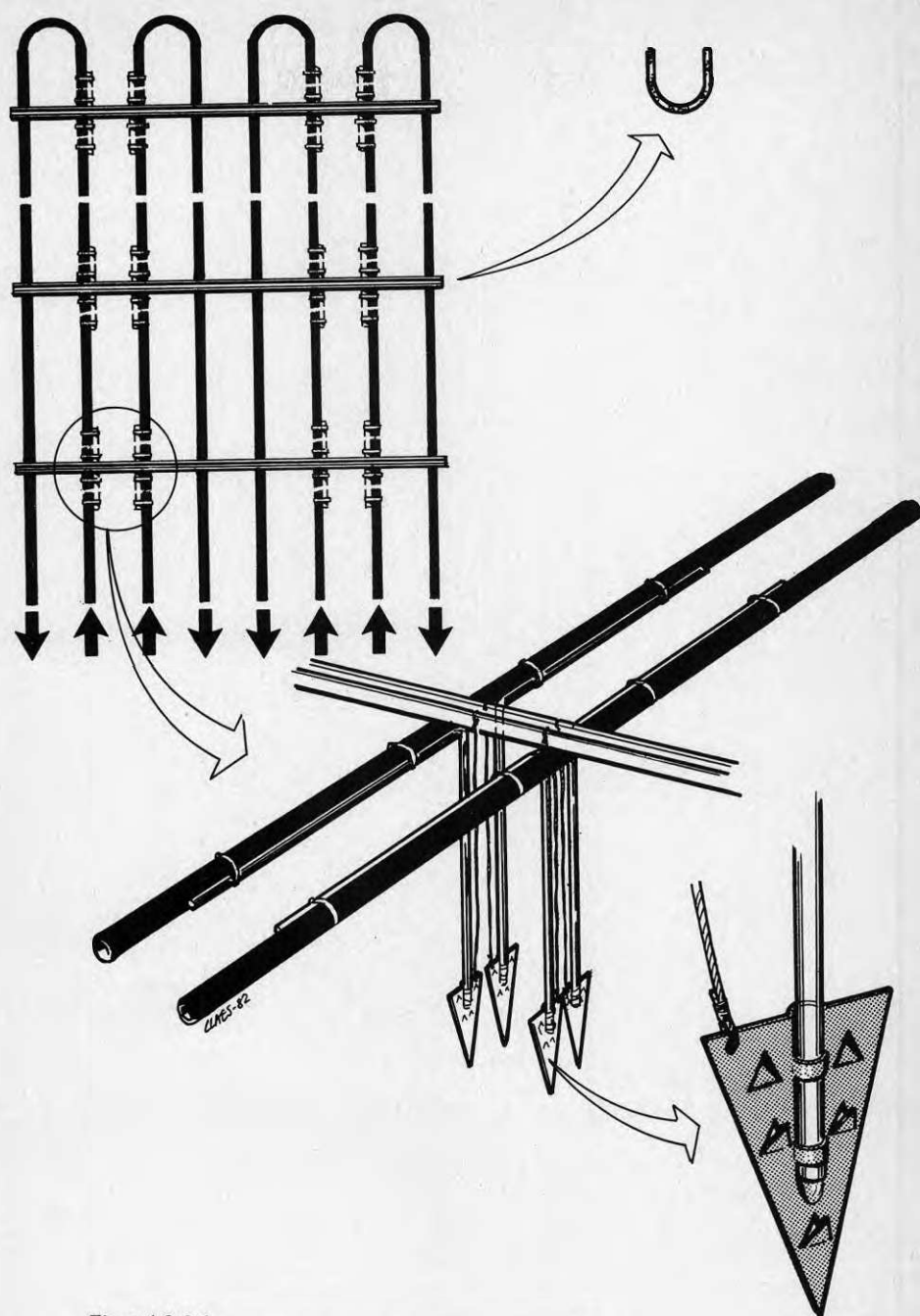


Figur 4.2
Vattentemperaturen i Storsjön, Jämtland.
Mätningarna utförda 1981-02-25-27.



Figur 4.3.1

Is cylindern vidgar sig och växer ut omkring de stenar som får isförbindelse med det energiupptagande plaströret.



Figur 4.3.2.1

Arrangemang för tjälsäkrade förankringspunkter med hjälp av heat pipes.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
800102-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till FFV Underhåll, Östersund.**

R83: 1982

ISBN 91-540-3745-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700583

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 25 kr exkl moms